

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

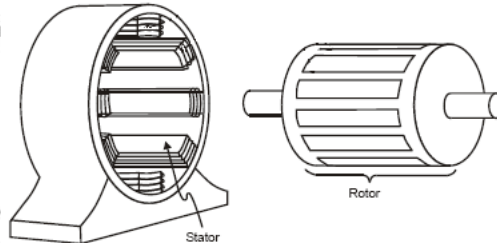
### 2.1 Motor Induksi Tiga fasa

Komponen utama motor induksi tiga fase adalah stator stasioner dan rotor yang berputar. Motor induksi tiga fase memiliki desain yang lebih simpel daripada motor DC, dan berkinerja dengan baik dan dapat diandalkan. Akibatnya, motor ini menjadi salah satu pilihan yang paling populer di antara berbagai jenis motor AC.

Motor induksi tiga fase sebenarnya dapat mempertahankan kecepatan yang sama baik dengan beban maupun tanpa beban. Namun, frekuensi memengaruhi kecepatan rotasi motor, sehingga sulit untuk mengontrol kecepatan [7].

#### 2.1.1 Struktur Motor Induksi Tiga Fasa

Konstruksi motor induksi tiga fase hampir mirip dengan motor listrik lainnya. Dalam motor ini, terdapat dua elemen utama, yaitu stator yang diam dan rotor yang berputar, sebagaimana tampak pada Gambar 2.1. Terdapat celah udara sempit dengan jarak antara 0,4 mm hingga 4 mm di antara stator dan rotor. [7].



**Gambar 2. 1** Penampang Stator dan Rotor Motor Induksi Tiga Fasa

Rumus daya motor 3 fasa:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \quad (2.1)$$

$$I = P/V \times \sqrt{3} \times \cos\phi \quad (2.2)$$

Keterangan:

P : Daya (Watt)

I : Arus (Ampere)

V : Tegangan (Volatage)

$\cos\phi$  : 85% dari motor, nilai standartnya 0.85

### 2.1.1.1 Stator

Stator terdiri dari beberapa inti laminasi yang masing-masing memiliki alur yang memungkinkan kumparan dimasukkan dalam bentuk silinder. Untuk memudahkan perakitan inti, setiap bagian laminasi inti terbuat dari lembaran besi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.a, dan Gambar 2.2.b menunjukkan bagaimana lapisan kertas memisahkan alur-alur laminasi inti. Dalam motor tiga fasa, setiap kumparan ditempatkan dalam alur yang disebut belitan fasa. Belitan-belitan ini dipisahkan secara elektrik dengan sudut 120 derajat. Kumparan dibuat dengan kawat tembaga yang dilapisi bahan isolasi tipis. Setelah itu, rangkaian laminasi inti dan kumparan stator ditempatkan di dalam cangkang silinder (seperti yang terlihat pada Gambar 2.2.c). Ilustrasi berikut menggambarkan contoh lembaran laminasi inti, lembaran inti yang telah dirangkai, dan belitan stator yang telah dipasang pada cangkang luar dalam motor induksi tiga fasa [7].



**Gambar 2. 2** Komponen Stator Motor Induksi

### 2.1.1.2 Rotor

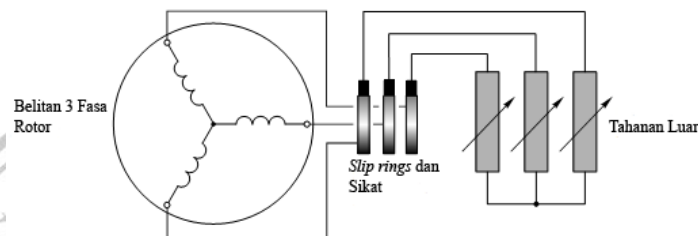
Motor induksi tiga fase dapat dimasukkan ke dalam dua kelompok berdasarkan jenis rotor yang digunakan. Kelompok pertama terdiri dari rotor sangkar tupai dan rotor belitan..

Jenis rotor belitan terdiri dari kumpulan penuh belitan tiga fasa yang mencerminkan belitan yang ada pada stator. Umumnya, belitan rotor tiga fasa diatur dalam konfigurasi Y, dan ujung dari ketiga kabel belitan fase rotor ini dihubungkan ke cincin selip yang terpasang pada poros rotor (seperti yang terlihat dalam Gambar 2.3.a). Kemudian, belitan rotor ini dipersingkat melalui sikat yang ditempatkan di dalam cincin selip (lihat Gambar 2.4), dengan menggunakan perpanjangan kabel untuk membuat koneksi ke luar..



a) Tampilan *Close-Up* Bagian *Slip Ring* Rotor Belitan  
 b) Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Belitan

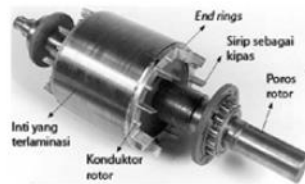
**Gambar 2. 3** konstruksi Rotor Belitan Motor Induksi Tiga Fasa



**Gambar 2. 4** Skematik Diagram Motor Induksi Rotor Belitan

Seperti yang terlihat di Gambar 2.4, dapat diketahui bahwa cincin selip dan sikat digunakan hanya untuk menghubungkan belitan rotor dengan resistansi eksternal. Resistansi eksternal berfungsi saat motor dihidupkan untuk membatasi aliran awal arus yang besar. Resistansi eksternal ini kemudian secara perlahan dikurangi menjadi nol seiring dengan mencapainya kecepatan motor pada level nominalnya. Saat motor mencapai kecepatan nominal, ketiga sikat akan terhubung tanpa resistansi eksternal, sehingga belitan rotor beroperasi seperti rotor sangkar tupai.

Rotor dengan desain seperti sangkar tupai memiliki kumparan yang terdiri dari beberapa konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai. Rotor jenis ini terbuat dari tumpukan lembaran tipis besi yang dilapisi, dan konduktor melilitinya, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.5.a. Lapisan-lapisan besi yang dilapisi ini dipadukan untuk membentuk inti rotor. Konduktor-konduktor aluminium dimasukkan ke dalam alur-alur di inti rotor untuk membentuk serangkaian konduktor yang melingkupi inti rotor. Rotor ini terdiri dari serangkaian konduktor yang terletak di alur-alur sepanjang permukaan rotor, dan ujung-ujungnya dihubungkan melalui cincin korsleting, yang juga dikenal sebagai cincin ujung [7].



a) Rotor Sangkar Tupai dan Bagian-Bagiannya

b) Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar Tupai

**Gambar 2. 5** Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar Tupai

### 2.1.2 Prinsip Kerja Motor Induksi

Dalam motor DC, arus diambil dari sumber tegangan dan dialirkan melalui konduktor armatur dengan bantuan sikat dan komutator. Saat konduktor armatur membawa arus melalui medan magnet yang dihasilkan oleh medan listrik, konduktor mengalami gaya yang mencoba untuk menggerakkannya dalam arah tegak lurus terhadap medan.

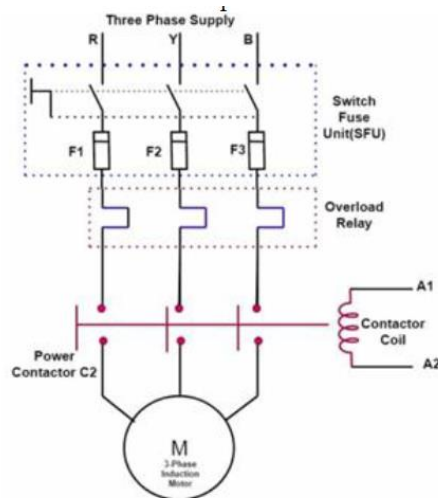
Dalam motor induksi, rotor tidak memiliki koneksi listrik langsung; sebaliknya, arus rotor dihasilkan melalui induksi. Meskipun berbeda dalam sumber daya listrik, prinsip-prinsipnya tetap serupa dengan motor DC. Konduktor rotor menghantarkan arus dalam medan magnet, mengakibatkan gaya pada konduktor yang berusaha untuk memindahkannya ke arah yang tegak lurus dengan medan.

Dengan menerima daya dari sumber tiga fase, kumparan stator menghasilkan medan magnet yang berputar pada kecepatan sinkron. Saat medan ini bersentuhan dengan konduktor rotor, mereka mengalami gaya gerak listrik yang diinduksi. Gaya gerak listrik ini serupa dengan gaya gerak listrik yang dihasilkan di gulungan sekunder trafo oleh fluks arus primer. Karena gaya gerak listrik yang diinduksi, arus dapat mengalir melalui sirkuit rotor melalui cincin ujung atau resistansi luar. Oleh karena itu, gaya yang bekerja pada konduktor rotor yang membawa arus dalam medan stator juga berlaku pada konduktor rotor itu sendiri [7].

### 2.2 Prinsip Kerja Direct on Line

Pengasutan motor induksi dengan metode *Direct On Line* (DOL) adalah cara langsung untuk memulai motor.. Pengasutan langsung berarti motor diaktifkan secara langsung saat saklar berada dalam posisi *ON*, oleh karena itu, menjalin koneksi langsung antara motor dan sumber tegangan utama sesuai dengan tegangan

nominal motor. Sebagai hasilnya, tidak diperlukan penurunan atau penyesuaian tegangan selama pengasutan, dan arus pengasutan akan setara dengan arus hubung singkat. [8]. Diagram skematik untuk pengasutan *Direct On Line* (DOL) dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2. 6** Diagram Skematik Pengasutan DOL

Untuk menentukan besar torsi beban dapat menggunakan persamaan 2.3 dan 2.4 dibawah ini:

$$T_{sh} = \frac{P_{out}}{\omega} \quad (2.3)$$

$$T_{sh} = \frac{P_{out}}{2\pi N/60} \quad (2.4)$$

Keterangan:

$T_{sh}$  = Torsi *shaft* (N.m)

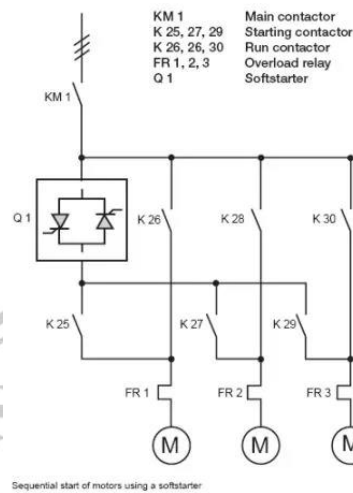
$P_{out}$  = Daya keluaran (Watt)

$N$  = Kecepatan rotor (Rpm)

### 2.3 Prinsip Kerja *Soft Starter*

Penggunaan *soft starter* memungkinkan untuk memulai mesin dengan mengubah kecepatan dan menghentikannya tanpa mengorbankan komponen mekanik dan energi listrik peralatan. *Soft starter* yang menggunakan *thyristor* dapat efektif mengendalikan motor induksi dalam menghadapi perubahan beban, dan pada gilirannya, meningkatkan efisiensi. Rangkaian *soft starter* konvensional

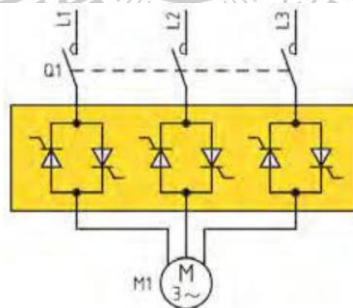
umumnya menggunakan rangkaian yang terdiri dari enam *thyristor* yang disusun *anti-parallel* [9], seperti yang terlihat pada gambar 2.7.



**Gambar 2. 7** Rangkaian Pengujian *Soft Starter*

### 2.3.1 Rangkaian Tiristor

Rangkaian sistem soft start terdiri dari 6 thyristor yang disusun anti parallel adalah pengontrol tegangan yang bertujuan agar tegangan ketika masuk ke motor dengan cara bertahap hingga tegangan terisi penuh pada motor. Pengasutan ini memiliki tujuan agar bisa mendapatkan arus awal yang rendah, juga sehalus mungkin, terproteksi dan dapat mencapai kecepatan normal motor yang konstan.

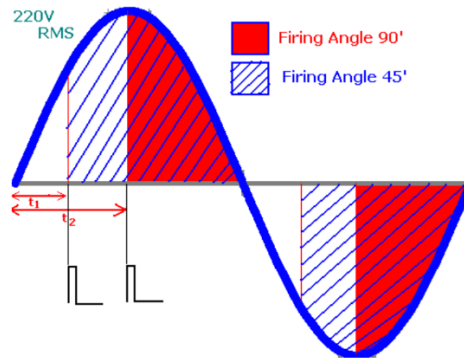


**Gambar 2. 8** Rangkaian Tiristor Anti-Paralel

### 2.3.2 Sudut Penyalan

Sudut penyalan adalah waktu setelah tegangan masuk mulai menjadi positif sampai tiristor dipicu yang artinya ketika tiristor diaplikasikan dengan tegangan AC. Untuk membuat ON, tiristor harus di sulut dengan sudut tertentu. Sudut ini disebut dengan sudut penyulutan/penyalan (*firing angle*). Tiristor disebut juga penyearah terkendali, karena memiliki *gate* yang berfungsi untuk mengendalikan arus. Teknik penyalan tiristor yang sering digunakan yaitu menggunakan arus

gerbang. Ini adalah salah satu cara paling umum, untuk mengaktifkan tiristor atau dalam pemacu gerbang, untuk menyalakan tiristor.

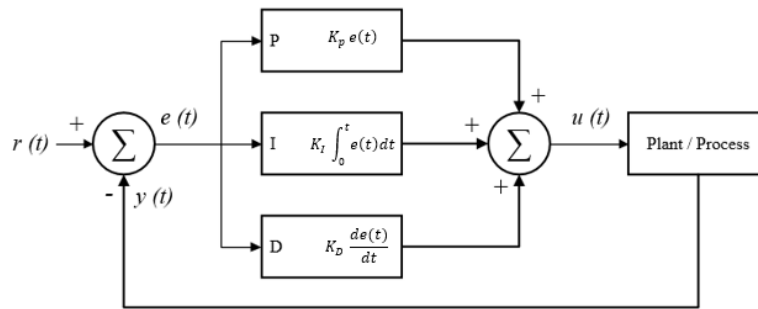


**Gambar 2. 9** Sudut Penyalaan

#### 2.4 PID (Proportional Integral Derivative)

Algoritma pengendalian PID didasarkan pada hukum pengendalian kesalahan sistem. Algoritma ini merupakan pengendalian optimal yang disesuaikan berdasarkan proporsi (P), integrasi (I), dan diferensiasi (D). Algoritma ini memiliki prinsip yang sederhana, presisi pengendalian tinggi, mudah diimplementasikan, dan praktis. Algoritma pengendalian PID memiliki efek yang jelas dalam proses kalibrasi sistem dinamis pada sistem kontinu. Untuk mengendalikan aliran sistem dengan akurat dan memastikan akurasi serta stabilitas operasi semprotan variabel, algoritma pengendalian PID digunakan untuk mencapai pengendalian berlingkar tertutup sistem [10].

Langkah pertama adalah melakukan analisis respons sistem loop terbuka untuk mengidentifikasi parameter yang perlu disesuaikan. Setelah itu, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis stabilitas sistem dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols. Dalam proses analisis ini, juga dipertimbangkan penerapan kontrol proporsional untuk memperbaiki waktu naik, kontrol derivatif untuk mengurangi overshoot, dan kontrol integral untuk mengurangi kesalahan saat sistem mencapai kestabilan. Selain itu, juga dilakukan penyesuaian pada parameter seperti  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  [7].



**Gambar 2. 10** Diagram Blok Kontroler PID

Persamaan kontrol PID dapat dituliskan dalam persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$mv(t) = K_p(e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t)dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (2.5)$$

Persamaan kontrol PID sebelumnya diturunkan pada persamaan 2.6 sebagai berikut:

$$mv(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.6)$$

Persamaan PID yang direpresentasikan dalam bentuk fungsi transfer dirumuskan dalam persamaan 2.7 sebagai berikut:

$$\frac{U[z]}{E[z]} = K_p + K_i \frac{T_i z + 1}{2 z - 1} + K_d \frac{z - 1}{z T_s} \quad (2.7)$$

#### 2.4.1 Kontrol Proporsional

Kendali proporsional adalah bentuk kendali yang memiliki potensi untuk mempercepat waktu naik dan mengurangi kesalahan pada suatu sistem. Pada prinsipnya, ini adalah penguatan yang dapat disesuaikan. Ini mengakibatkan keluaran hasilnya proporsional terhadap perkalian antara konstanta pengganda dan kesalahan penggerak [11].

#### 2.4.2 Kontrol Integral

Kendali *integral* adalah jenis kendali yang mampu mengurangi nilai *overshoot* dan mempercepat mencapai keadaan mantap. Kendali integral sering digunakan bersama dengan kendali lain karena tidak mampu berdiri sendiri, namun memiliki sifat penyeimbang yang dapat menyebabkan sistem kontrol yang ditingkatkan dengan elemen penyeimbang integral dapat menghasilkan respons sesuai dengan yang diinginkan [11].



### 2.4.3 Kontrol Derivative

Kendali *derivative* adalah jenis kendali yang memiliki sifat seperti diferensiasi, yang memungkinkannya untuk memprediksi nilai kesalahan berdasarkan nilai kesalahan sebelumnya, sehingga menghasilkan keluaran yang stabil. Kendali ini dapat diterapkan baik secara mandiri maupun dalam gabungan dengan kendali integral atau kendali proporsional integral [11].

### 2.5 Integral Time multiplied by Squared Error (ITSE)

Sistem kendali berumpan balik berperan penting untuk mengurangi galat,  $e(t)$  antara setiap variabel dan mencapai nilai nol secepat mungkin. Oleh karena itu, kriteria apapun yang digunakan untuk mengukur kualitas respon sistem harus memperhitungkan variasi  $e$  selama rentang seluruh waktu. ITSE memiliki pengali waktu tambahan dari galat fungsi yang menitik beratkan pada lamanya durasi galat, oleh karena itu kriteria ini paling sering diterapkan dalam sistem membutuhkan waktu penetapan yang cepat. Persamaan ITSE diberikan dalam bentuk persamaan 2.8 berikut ini:

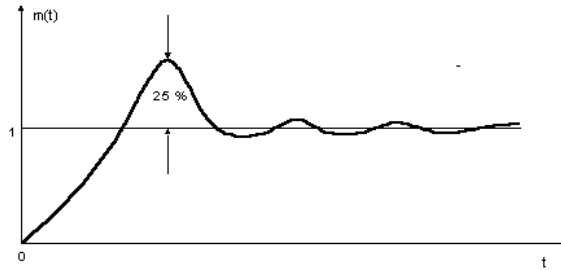
$$ITSE = \int_0^{\infty} t\{e(t)\}^2 dt \quad (2.8)$$

### 2.6 Metode Penyetelan Ziegler-Nichols

Metode Zeigler-Nichols adalah salah satu metode penyetelan yang digunakan untuk mengukur nilai *Proportional gain* ( $K_p$ ), *Integral Time* ( $K_i$ ), dan *Derivative Time* ( $K_d$ ) dalam sistem kendali. Metode ini pertama kali diperkenalkan pada tahun 1942. Dalam pengukuran nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  menggunakan metode Zeigler-Nichols, ada dua pendekatan yang digunakan, yaitu metode osilasi (dengan siklus berkelanjutan) dan kurva reaksi dengan lonjakan maksimum sistem sebesar 25% [11].

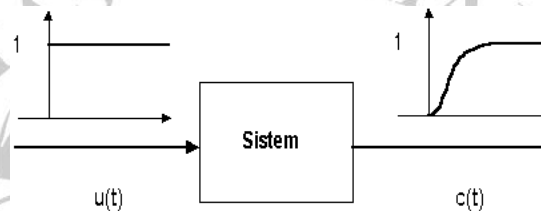
#### 2.6.1 Ziegler-Nichols Metode Kurva Reaksi

Metode kurva reaksi bertujuan untuk mencapai respons sistem dengan overshoot maksimum sekitar 25%. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11.

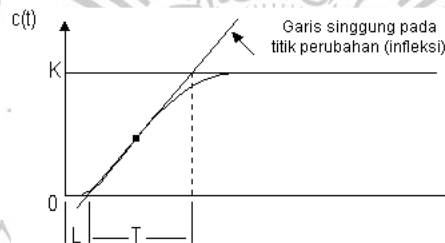


**Gambar 2. 11** Kurva Respon Sistem Dengan *Overshoot* Sebesar 25%

Pendekatan ini bergantung pada tanggapan sistem *loop* terbuka. Ketika plant, dalam bentuk *loop* terbuka, diberikan sinyal tangga satuan seperti yang terlihat pada Gambar 2.12, respons sistem akan mengambil bentuk "S." Gambar 2.13 menggambarkan kurva respons berbentuk "S".



**Gambar 2. 12** Sistem Ketika Diberikan *Input Step*



**Gambar 2. 13** Kurva Respon Berbentuk "S"

Dengan *transfer function* sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{k}{1+sT} e^{-sL} \quad (2.9)$$

Pada kurva respon tersebut ada 2 konstanta waktu yaitu waktu tunda (L) dan waktu konstan (T). Dari Gambar 2.13, terlihat bahwa kurva respons mengalami peningkatan setelah periode waktu L. Sementara itu, periode waktu T menggambarkan perubahan kurva setelah mencapai nilai K, di mana K adalah *set point* statis dari sistem.

Penyetelan parameter PID bergantung pada perolehan parameter-parameter tertentu ini. Melalui serangkaian eksperimen, Ziegler dan Nichols merekomendasikan penyetelan parameter  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  berdasarkan nilai-nilai

tertentu ini. Tabel 2.1 merinci formula penyetelan PID yang berasal dari metode kurva reaksi [12].

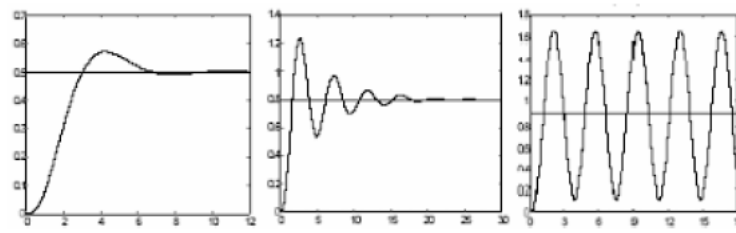
**Tabel 2. 1** Penyetelan Parameter PID Menggunakan Metode Kurva Reaksi

Parameter	Kp	Ti	Td
<b>P</b>	T/L	$\infty$	0
<b>PI</b>	0.9T/L	L/0.3	0
<b>PID</b>	1.2T/L	2L	0.5L

### 2.6.2 Ziegler-Nichols Metode Osilasi

Metode osilasi Ziegler-Nichols melibatkan penggunaan kurva loop tertutup, di mana masukkan referensinya adalah fungsi *Step* (tangga). Dalam metode ini, hanya kontrol proporsional yang digunakan. Nilai Kp disesuaikan mulai dari 0 hingga mencapai nilai kritis Kp di mana keluaran terus-menerus bergetar dengan amplitudo yang sama. Nilai kritis Kp ini juga disebut sebagai Ku.

Gambar 2.14 menampilkan respons keluaran yang muncul dalam tiga situasi berbeda dengan pengaturan gain proporsional. Sistem dapat mengalami osilasi yang stabil ketika nilai Kp sama dengan Ku.



**Gambar 2. 14** Grafik Ziegler-Nichols Metode Osilasi

Periode *ultimate*, atau  $T_u$ , diukur setelah sistem mengalami osilasi berkelanjutan. Nilai *Gain Ultimate*,  $K_u$ , dan Periode *Ultimate*,  $T_u$ , digunakan sebagai dasar untuk menghitung konstanta kontrol sesuai dengan metode empiris Ziegler-Nichols yang tercantum dalam Tabel 2.2 berikut [13]:

**Tabel 2. 2** Penyetelan Parameter PID Menggunakan Metode Osilasi

Parameter	Kp	Ti	Td
<b>P</b>	0.5 $K_u$	$\infty$	-
<b>PI</b>	0.45 $K_u$	(1/1.2) $P_u$	-
<b>PID</b>	0.6 $P_u$	0.5 $P_u$	0.125 $P_u$

## 2.7 PSO (Particle Swarm Optimization)

*Particle Swarm Optimization* (PSO) adalah metode yang didasarkan pada perilaku dan pergerakan kelompok burung yang mencari target. Algoritma ini dikembangkan untuk mengoptimalkan fungsi nonlinear dan multidimensi. Algoritma PSO bekerja dengan sejumlah partikel tertentu yang disebut populasi. Algoritma PSO menginisialisasi populasi secara acak, di mana setiap partikel memiliki posisi  $x_i(t)$  dan kecepatan  $v_i(t)$  terhadap target. Kemudian, setiap partikel dievaluasi dalam loop utama, di mana  $x_i(t)$  dan  $v_i(t)$  diperbarui dalam setiap iterasi. Posisi baru dibandingkan dengan posisi lokal terbaik sebelumnya  $P_i(t)$ . Jika posisi baru lebih baik, maka posisi lokal terbaik diperbarui. Terakhir, posisi baru juga dibandingkan dengan posisi global terbaik  $g(t)$ , di mana  $g(t)$  adalah yang paling mendekati target. Jika posisi baru lebih baik, maka nilai posisi global terbaik diperbarui. Kecepatan  $v_{ij}(t)$  dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t) (p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t) (p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (2.10)$$

Dan posisi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (2.11)$$

Dalam rumus ini,  $i$  mengacu pada nomor partikel dalam populasi dengan  $N$  adalah banyaknya populasi,  $j$  adalah nomor dimensi, dan  $D$  adalah jumlah dimensi.  $t$  adalah nomor iterasi, dengan  $iter$  sebagai jumlah maksimum iterasi.  $x_{ij}(t)$  adalah posisi partikel  $i$  pada dimensi  $j$  pada iterasi  $t$ , sementara  $v_{ij}(t)$  adalah kecepatan partikel  $i$  pada dimensi  $j$  pada iterasi  $t$ .  $P_{ij}(t)$  adalah posisi terbaik lokal partikel  $i$  pada dimensi  $j$  pada iterasi  $t$ , sedangkan  $g_j(t)$  adalah posisi terbaik global.  $\omega$  adalah faktor inersia, sementara  $C1$  dan  $C2$  adalah konstanta percepatan.  $r1$  dan  $r2$  adalah angka acak independen yang memiliki distribusi seragam di antara (0,1) [14].